

암반 사면의 복합 파괴 메커니즘 규명 Complex failure mechanism of rock slopes

윤운상¹⁾, Woon-Sang Yoon, 정의진²⁾, Uijin Jeong, 박성욱³⁾, Sung-Wook Park, 최재원³⁾, Jae-Won Choi

- 1) 주식회사 넥스지오 대표이사, CEO, NEXGEO Inc.
- 2) 주식회사 넥스지오 책임이사, Director, NEXGEO Inc.
- 3) 주식회사 넥스지오 차장, Team Manager, NEXGEO Inc.

SYNOPSIS : Slope failures can be occurred by complex mechanism. In this cases, failures shows characteristics of complex failure mechanism during progressive mass movements. A case is a merged large slide with two sliding events triggered by slip on fault plane. Another case shows extension of failure area by sliding or subsidence at backyards of toppling areas. Generally, areas of progressive failures have wider than them of simple events.

Keywords : complex slope failure, progressive failure, slide, toppling

1. 서 론

Hoek and Bray (1981)은 암반 사면에서 발생할 수 있는 파괴면의 형상에 따라, 사면의 파괴를 평면 파괴, 썩기 파괴, 전도 파괴 및 원호 파괴로 구분한 바 있다. 현실에서 발생하는 대부분의 사면 파괴는 이 네 가지 유형에 해당하거나, 이의 복합적인 성질을 가지게 된다. 이 연구에서는 실제 발생한 사면 파괴의 사례를 분석하여 이들 파괴 형태의 복합성과 그 발생 메커니즘을 분석하고자 한다. 일반적으로 사면의 파괴 유형은 사면의 형상, 풍화 및 불연속면 상태 등 지질 상태에 의해 규제되는 것으로 알려져 있다. 그림 1은 동일한 사면에서 암종의 차이, 사면의 방향 변화 등에 의해 서로 다른 상이한 파괴가 뚜렷한 유형을 가지고 나타나는 사례이다. 비교적 풍화심도가 깊은 화강암에서는 원호 파괴가 발생하고, 뚜렷한 절리 발달 상태를 보이는 사암에서는 사면의 방향에 따라 썩기 파괴와 평면 파괴가 발생하고 있다.

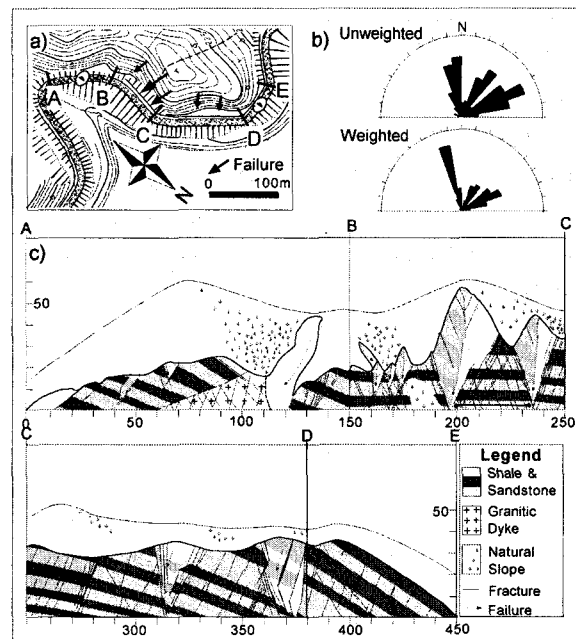


그림 1. 사면 특성과 일반적 파괴 유형 발생 사례

이렇게 우세한 파괴 유형은 토층의 심도, 불연속면의 빈도와 사면과의 방향성 관계를 분석하면, 일반적 경향을 비교적 쉽게 예측할 수 있다. 그러나 두 개 이상의 파괴 메커니즘이 작용하거나, 파괴 진행 과정 중에 두 개 이상의 파괴 형태가 중첩되어 있는 경우, 파괴 형태는 복합적 형태를 가지게 되어 쉽게 예측하기 어려운 상태가 된다. 사면 붕괴의 메커니즘에 대해 Varnes(1978)는 그 유형을 붕락(fall), 전도(topples), 활동(slides), 퍼짐(spreads), 유동(flows)으로 구분한 바 있으며, 이 중 활동을 다시 췌기 파괴 및 평면 파괴에 해당하는 병진 활동 (translational sliding)과 원호 파괴에 해당하는 회전 활동 (rotational sliding)으로 구분한 바 있다. 여기에서는 두 가지 사면의 사례를 통해 두 개 이상의 사면 파괴가 중첩되거나, 두 개 이상의 사면 메커니즘이 복합적으로 작용한 사례에 대해 검토하고자 한다.

2. 복합 활동 파괴

2.1. 사면 파괴 개요

그림 2는 사례 사면의 암종, 단층, 풍화 특성 그리고 지하수 상태 등과 같은 지질요소와 함께 식생 분포, 붕괴 토체의 표면 형태 등을 기재된 공학적 지질도이다. 지표에서 관찰되는 붕괴 구간은 절취사면에서부터 상부자연사면에 이르기까지 총 연장 177.6m에 최대 너비 56.3m의 규모를 가지며, 좁고 긴 형상을 이루는 것이 특징이다.

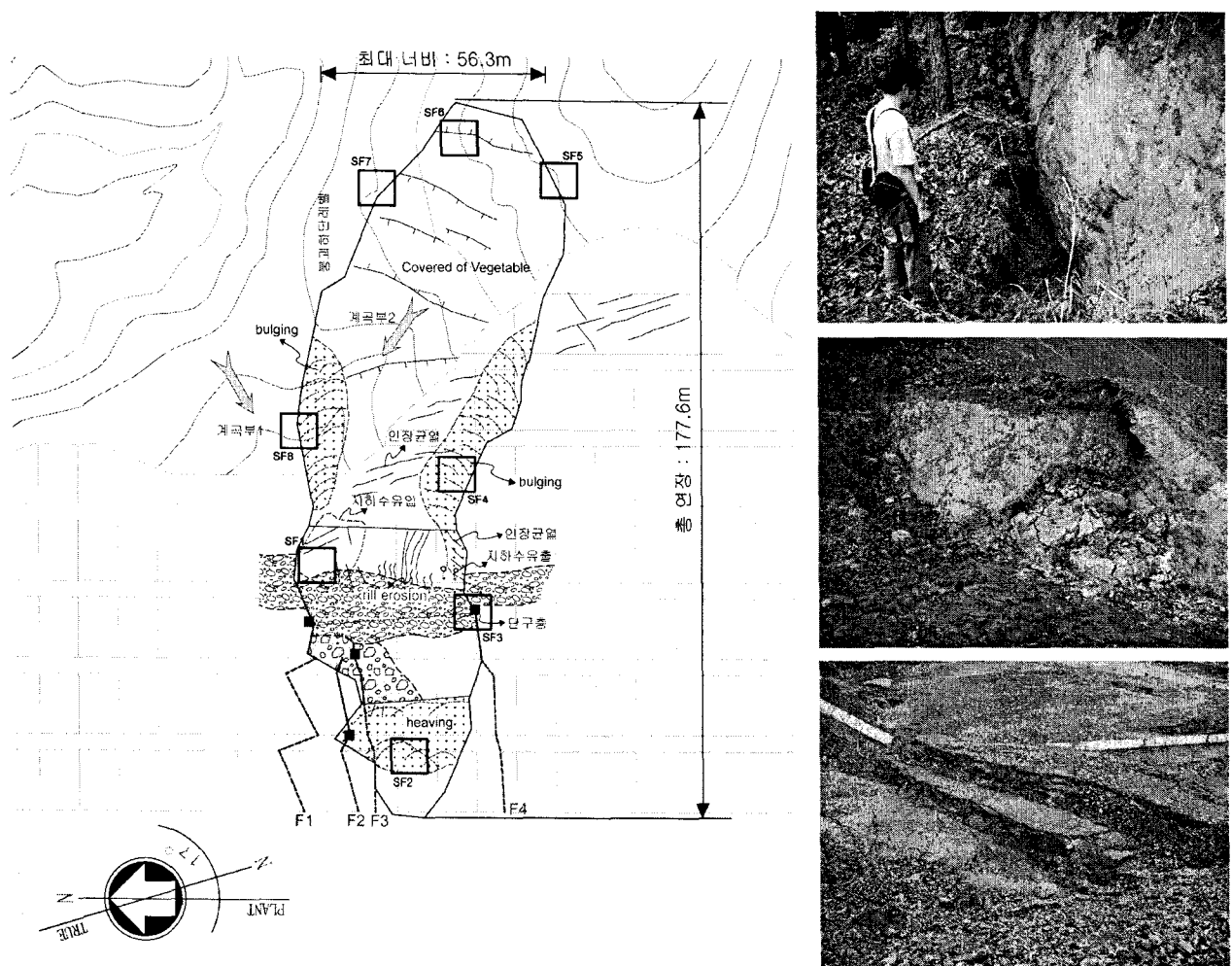


그림 2. 파괴 사면 지질도와 사진 (위에서부터 SF6, SF1, SF2)

분포 암층은 EL. 40m (제 3~4 소단)에 두께 4~5m로 분포하는 단구층을 기준으로 하여 하부에는 풍화가 심한 백악기 울산층의 이암 및 사암이 분포하며, 상부에는 토사층으로 이루어져 있다. 이 같은 지질 특성을 미루어 보았을 때, 붕괴 구간의 원지반 강도가 비교적 낮음을 알 수 있다. 사면에서는 F1, F2, F3, F4의 총 4개의 단층이 관찰된다. 이 중 붕괴 하단부 이암 및 사암 분포 구간의 경우 단층에 의해서 경계가 이루어지는데, 남쪽 경계는 NW-SE 방향 (F1), 그리고 북쪽 경계는 ENE-WSW 방향 (F4) 단층에 의해 각기 구획 된다.

특히 흥미로운 현상은 주 활동 붕괴면과 순방향 (synthetic) 또는 역방향 (antithetic)의 경사각을 보이며 발달하고 있는 고각의 2차 전단 활동면이다. 이들 2차 활동면은 활동 방향을 지시하는 동시에 사면의 붕괴가 연쇄적인 활동에 의해 최종적으로 진행되었음을 지시한다. 이러한 2차 전단 활동면과 인장균열의 경우, 상부 자연사면과 하부의 절취사면 구간에서 그 방향성이 다르게 나타나는데, 이러한 형태는 토체의 활동 방향이 위치에 따라 달랐다는 것을 의미한다. 즉 절취사면구간과 상부자연사면구간의 경계부에 NNE-SSW 방향으로 발달하는 인장균열은 ESE 방향으로의 토체 이동을, 그리고 상부자연사면구간에서 NE-SW 방향으로 발달하는 인장균열은 SE 방향으로의 토체 이동을 지시하는 것이다.

이렇게 절취 사면과 상부 자연 사면에서 발생한 파괴 방향의 차이는 전기 비저항 탐사 결과 (그림 3) 확인된 하부 절취 사면의 파괴면과 상부 자연 사면의 파괴면의 중심 위치가 동일 직선 상에 놓이지 않고, 휘어져 있거나, 또는 분리되어 있는 현상과 일치한다. 이는 하부 절취 사면의 파괴와 상부 자연 사면의 파괴가 동시기 단일 운동에서 발생한 것이 아니라, 연속적인 두 개의 활동이 중첩되어 있는 것으로 해석될 수 있다.

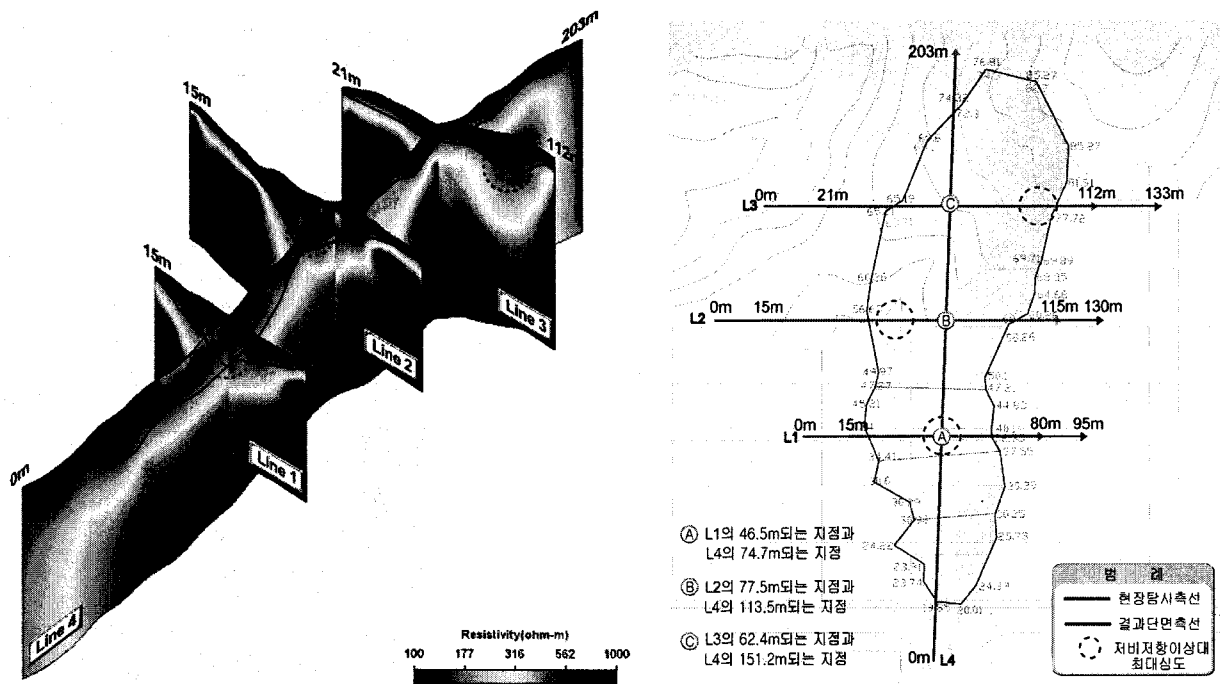
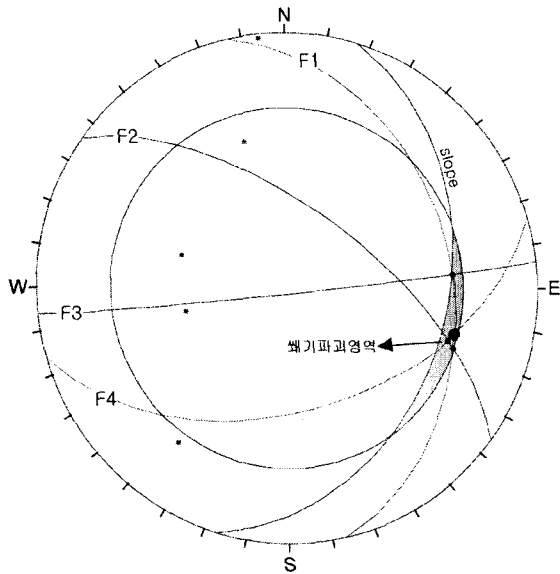


그림 3. 전기 비저항 탐사 결과: 파괴 활동면의 추정

2.2. 사면 파괴 메카니즘

F1~F4 단층을 stereographic projection을 이용해 도시하여 본 결과, 단층들의 교차에 의해서 썩기 파괴가 발생할 가능성이 매우 높은 것으로 나타났다 (그림 4). 특히 붕괴 토체의 양쪽 경계에 발달하는 단층 (F1, F4) 조합이 썩기 파괴 영역 내에 도시되는데, 이는 썩기 파괴가 단구층 하부 이암 및 사암 분포구간의 붕괴를 제어한 요인으로 작용했음을 강하게 시사한다.



가능 교차 단층	쇄기 파괴 여부
F1 × F2	○
F1 × F3	○
F1 × F4	○
F2 × F3	×
F2 × F4	○
F3 × F4	×

그림 4. stereographic projection을 이용한 쇄기 파괴 분석

이러한 단층면에 의한 쇄기 파괴 가능성이 존재하나, 파괴 선단부의 허빙 현상 등을 고려한다면, 절취 사면 파괴의 주 활동면의 구성은 양 측면을 단층면으로 하고, 저면부는 비교적 연약한 지층내를 통과하는 복잡한 형상의 회전 활동으로 해석된다. 이렇게 절취 사면의 붕괴를 발생 시킨 주 파괴면은 단층면을 따르는 병진 활동 파괴와 연약한 암체 내 회전 활동 파괴의 복합 작용에 의해 형성되었으며, 이러한 주활동면에 의한 서남서 방향의 암반 내 활동 파괴에 연속적으로 상부 자연 사면에서 서북서 방향의 토암 경계를 따르는 원호 파괴가 발생되어 최종적인 이 사면의 파괴 형상을 규정지은 것으로 평가되었다. 그림 5는 사례 사면의 파괴면에 대한 최종 해석 도면으로서 이상의 복합적인 활동 파괴와 2차 전단 활동면의 관계를 보여주고 있다.

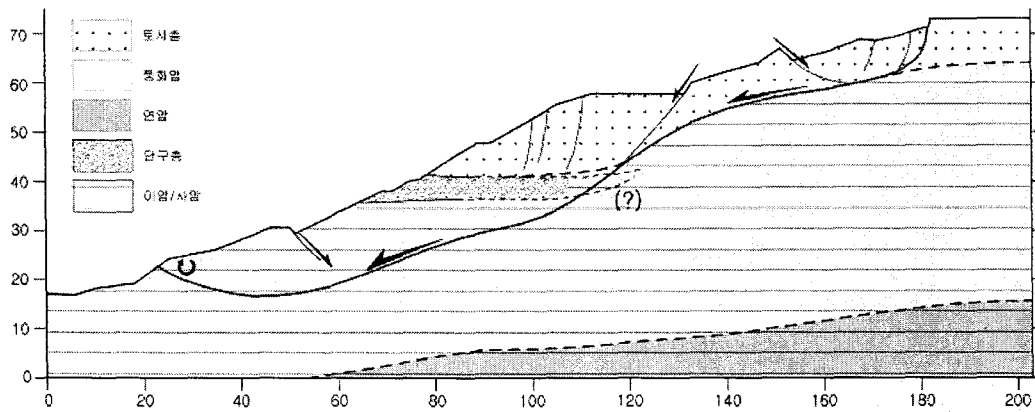


그림 5. 사례 사면의 복합 활동 파괴 해석

3. 전도-활동 복합 파괴

3.1. 전도-활동 복합 파괴의 동시 발생

전도 파괴와 활동 파괴의 복합적 발생 문제는 이전부터 관심있는 분야 중 하나이다. Hoek & Bray (1981)는 경사면 위의 단일 사각 블록을 대상으로 저면의 경사와 블록의 폭과 높이의 비에 의해 전도파

괴와 활동파괴의 발생 영역과 전도와 활동이 동시에 발생하는 영역을 구분한 바 있다. 또한 윤운상의 (2000)는 사면에 대한 수치 해석적 연구를 통해 단일 블록 모델의 사면 적용과 함께, 절리의 간격에 따라 전도 파괴 영역에서 활동 파괴의 특성이 나타날 수 있음을 언급한 바 있다 (그림 6). 이러한 예들은 모두 두 메카니즘이 동시에 중합되어 작용하는 모델에 해당한다.

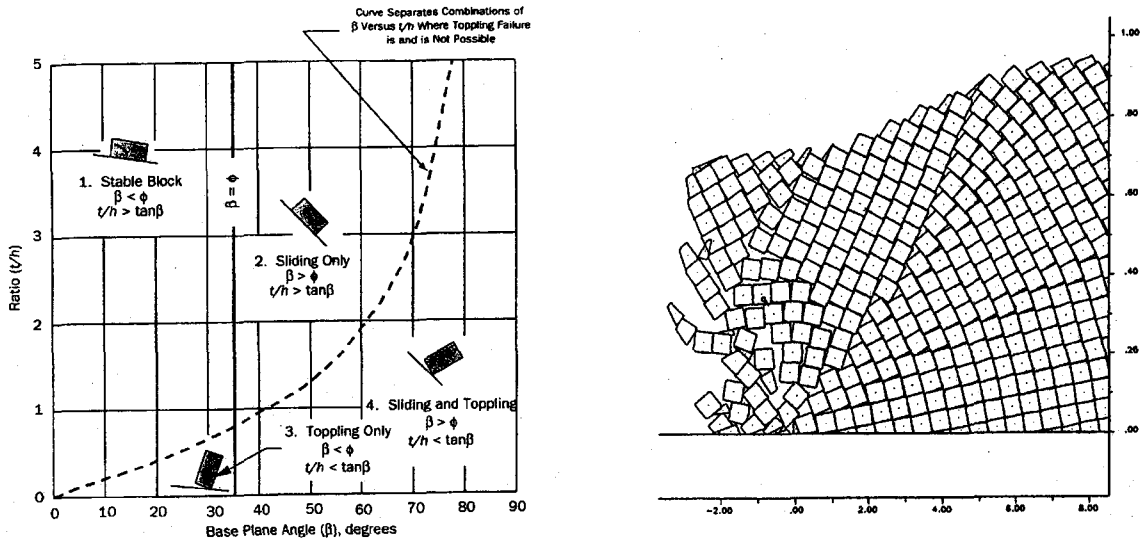


그림 6. 전도 파괴와 활동 파괴의 연관성

3.2. 진행성 전도-활동 복합 파괴

사례 사면은 전도 파괴가 지배적으로 발생한 사면 사례로서 사면을 구성하는 지질은 백악기말의 화산암과 이를 관입한 백악기 말의 화강암 및 제 3기 맥암류와 이를 부정합으로 피복하고 있는 제 4기의 상퇴적물로 이루어져 있다. 그림 7은 이 사면에서 발생한 전도 파괴 현황으로서 사면의 경사와 반대 방향의 고경사를 이루는 불연속면 (Set 1)에 의해 발생한 전도 파괴로 암괴의 전도로 인한 역경사가 전형적으로 관찰된다. 평사 투영 결과에 의하면, 이 사면에 발달하고 있는 불연속면은 크게 Set 1, 2, 3로 구분될 수 있으며, Set 1에 의해 전도 파괴가 발생할 가능성이 높음을 지시하고 있어, 이와 일치하는 현상이다.

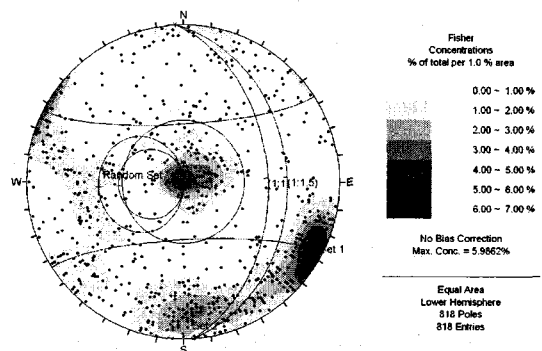


그림 7. 전도 파괴 현황과 평사 투영 결과

이 사례에서 특징적인 것은 선행하여 전도 파괴가 발생한 이후, 전도 파괴 후방에서 원호 파괴가 연속적으로 발생하고 있는 점이다. 그림 8은 그 예 중의 하나로서, 전도 파괴가 발생한 이후, 블록의 전도로 인해 분리된 공간에 후방의 역경사진 블록이 활동 파괴에 의해 공간을 채우는 형태로 함몰이 발생하고 있다.

지표에서 그림 5의 주 활동 파괴면 전방에서 발생한 이차적인 역방향의 전단 활동에 의한 함몰대와 유사한 양상을 보이거나, 이 경우는 선행 발생한 전도 파괴 후방에서 발생한 함몰이라는 점에서 발생 기작 상에 큰 차이를 보인다.

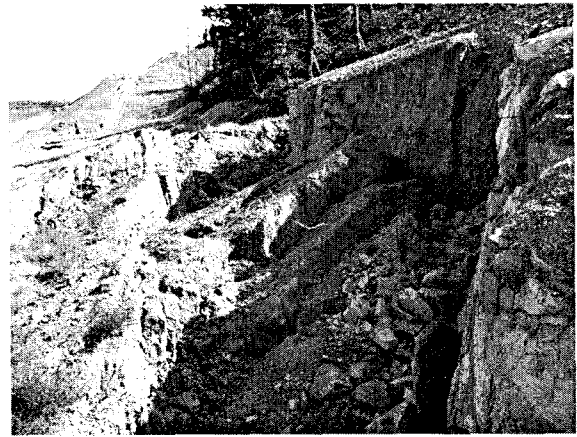


그림 8. 전도 파괴 후방의 함몰

4. 결 론

연속된 두 가지 사건에 의하여 형성된 복합 파괴를 중심으로 사례 분석을 실시하였다. 한 사건 내에 두 가지 복합적인 요인으로 인하여 발생하는 사면 파괴와 함께, 연속된 사건에 의해 발생한 사면의 복합적인 파괴는 단일 요인, 단일 사건에 의해 발생한 파괴와는 다른 형태적 특징을 가지고 있다. 이러한 복합 파괴는 일반적으로 파괴를 지속적으로 진전시키고, 그 범위를 확대하는 경향을 보인다. 따라서 파괴 그 자체의 가능성 뿐 아니라, 발생한 파괴로부터 연속적으로 진행될 수 있는 파괴를 예측하므로써 사면 붕괴로 인한 재해 규모의 최소화와 적절한 대응책 마련에 활용할 필요가 있다.

참고문헌

1. 윤운상, 권혁신, 김정환, 2000. 절리 간격이 암반사면의 안정성에 미치는 영향. 한국지반공학회 가을 학술발표회 논문집, p.511-518.
2. Hoek, E. & Bray, J., 1981. Rock Slope Engineering 3rd eds. Inst. Min. and Metall, London.
3. Varnes, D. J., 1978. Slope movement types and processes. In Special Report 176: Landslide: Analysis and Control, TRB, National Research Council, Washington, D. C., 11-33.